引用格式：吴季. 载人航天、深空探测和科学卫星三类任务中的空间科学. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1635-1641.
Wu J. Space science in manned space flight, deep space exploration and scientific satellite programs. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(11): 1635-1641. (in Chinese)

载人航天、深空探测和科学卫星三类任务中的空间科学

吴 季
1 中国科学院国家空间科学中心 北京 100190
2 中国科学院大学 北京 100049

摘要 为落实习近平总书记关于要推动空间科学、空间技术、空间应用全面发展的指示，我国航天事业在近年来出现了可喜的发展。空间科学成为越来越多从事航天事业的大学和科研机构关注的对象。然而，对于空间科学在载人航天、深空探测和科学卫星这三类任务中如何发挥其作用，仍然有不少疑问和困惑。文章从空间科学发展的起源，以及载人航天、深空探测和科学卫星各自的特点，探讨空间科学在其中所起到的作用，并提出政策建议。

关键词 载人航天，深空探测，科学卫星

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20220925001

1 空间科学的起源与定义

从 1957 年 10 月发射第一颗人造卫星开始，人类就进入了太空时代。当时，人类对太空的了解非常少，如对电离层以外的空间环境如何、太阳辐射的粒子到达地球空间后如何运动还尚不清楚。因此，就应运而生了对空间开展直接研究的新学科，并被称为空间研究（Space Research）。1958 年，在美苏两个航天大国和部分西方国家的倡议下，国际科学联盟理事会（ICSU）成立了一个特别委员会来应对当时所有的学科联盟都无法覆盖的这个新研究领域。这就是现在空间科学领域唯一的国际组织“国际空间研究委员会”（COSPAR）[①]。

此后，在美苏的太空竞赛中，双方都在力争太空领域中的第一。虽然无暇开展专门的太空研究，但是两国在各种航天器上都力争搭载了粒子探测器、磁场探测器和其他空间环境探测载荷，并获得了大量的针对空间环境的原位（*in-situ*）探测数据。由此诞生了以

资助项目：中国科学院战略研究专项（Y82131A28S）
修改稿收到日期：2022 年 11 月 3 日

① https://cosparhq.cnec.fr.

研究空间为主要目标的学科，逐渐浓缩为空间物理学或空间等离子体物理学。

在之后的数十年中，空间物理学一直是空间科学的核心学科。从对地球空间中等离子体及其运动规律的研究，逐渐拓展到对地球空间以外的从太阳上层大气到太阳系边界的整个行星际空间，也拓展到了月球、水星、金星、火星、木星和土星及其卫星周边的空间环境。

人类在初步了解了太空的环境以后，开始利用飞行器的平台从事天文观测。该观测方法的优点是可以突破大气层对电磁波某些频段的阻隔，如甚低频电磁波频段、比毫米波频率还要高的太赫兹频段，以及紫外频段及以上的 X 射线和伽马射线。为此，美国在 20 世纪 60—70 年代建立了 3 个天文卫星系列，分别是太阳观测平台、天文观测平台和高能观测平台。这使得空间天文学成为空间物理学之后空间科学领域的又一个重要分支。与空间物理学不同的是，很多用于天文领域研究的望远镜仍然在地面上，因此天文卫星往往并不是空间天文学领域的大多数科学家唯一可以获得数据的来源。

几乎与对地球空间的探测同步展开的，太空竞赛期间，美苏最大的竞争方向是深空探测。月球、金星、火星、小行星，以及之后的太阳系边界探测，都给对行星的研究带来了大量的新数据——不仅仅是那里的空间环境和遥感数据，更重要的是实现着陆之后获得的岩石、土壤和地质信息。这使得大量地球化学科学家、地质地理科学家加入到了空间研究的队伍，促进了空间科学另一个分支学科——行星科学的发展。

与空间科学领域其他分支学科的发展不同，空间地球科学对地球系统的研究的起步是由于遥感应用卫星的发展。居高临下是从太空观测地球的优势。从数百公里高的轨道上飞过，你可以看到数千公里范围内的地面上正在发生着什么。当然，如果天气不好（如有云），光学遥感器就无法观测了。但是对气象预报，从这个高度哪怕是观测云顶的移动和变化，都非常有用。科学家还在紫外波段的遥感观测中发现了臭氧洞。这些应用数据逐渐积累，直到推动了空间地球科学作为空间科学中一门比较新的、利用遥感卫星研究地球系统变化的学科的确立。

在载人航天起步的时候，微重力和空间生命科学的研究同时开始起步。因为载人航天的实际需求非常迫切，这两个领域的科学研究从一开始就有明确的应用目标，即服务于载人航天任务。然而，它们和同样具有应用意义的空间地球科学不一样。对地球空间科学而言，遥感图像具有非常直接的“看图识字”功能，甚至不需要研究就可以识别出目标（如台风）。但是，在太空中的微重力环境下，当地球表面那 1 G 的重力加速度的“面纱”被揭开以后，“物质（特别是流体）以及生命体在无重力干扰的情况下的运动本质到底是什么？”是需要开展大量研究的。特别是对复杂的人体系统，更是需要不断的、深入的研究，这被称为航天医学。这就推动了微重力和空间生命科学两个学科领域的发展。

可见空间科学成为一个新兴的、交叉的，且包含众多学科分支（空间物理学、空间天文学、行星科学、空间地球科学、微重力和空间生命科学，以及基础物理试验）的科学领域，是伴随着人类进入太空的步伐逐渐发展起来的。如果用一句话来定义空间科学，就是：利用航天器为主要平台，研究发生在日地空间、行星际空间乃至整个宇宙空间的物理学、天文学、化学和生命科学等自然现象及其规律的综合性交叉学科[1]。

2 载人航天任务的特点

载人航天任务因为有人参与，使其具有了很高的公众关注度。载人航天在发展初期虽然受到了冷战和太空竞赛的驱动，但是在一定程度上也反映了人类的

探索精神。苏联在载人航天领域的零的突破，美国“阿波罗计划”将人类首次送上月球，仍然是他们至今还在享用的政治资本。因此，载人航天任务的最大特点就是其公众关注度高带来的政治性。

然而，要想取得公众的关注度，就必须不断地实现突破，为公众带来新的关注热点，而不是重复那些已经做过的、毫无新意的任务。但是，当主体变更了以后，尽管某些技术能力仍在使用。例如，杨利伟在2003年实现了中国人独立自主的天地往返，虽然比苏联的加加林晚了42年，但仍然可以在中国人心中激励起自豪感。再如，印度如能在未来5—7年内实现自主的载人天地往返，虽然比加加林晚了60多年、比中国晚了20年，但仍会在印度人心中激励起自豪感。因此，载人航天的公众性是由执行任务的主体而决定的，具有地域和民族性。当然，如果想引起全人类的公众的关注，载人航天就必须实现人类的第一次。

如果是在同一个地域和国家内，载人航天要持续保持公众的关注度，就一定要有不断的突破。例如，从单人1天到多人多天、从男航天员到女航天员、从舱内活动到出舱活动、从单舱到多舱的交会对接，直至空间站建设等。但是，这些都是技术性的突破，并不是空间科学研究的突破。

必须承认，利用载人航天平台，即使是在设施最为完善的、长期有人照料的空间站上开展空间科学研究，也是有一定的限制边界的。这种限制首先是来自轨道。载人航天平台由于要确保航天员少受太空粒子辐射，以及要避免来自大量低轨道地球卫星碰撞的威胁，通常选择400公里高度左右的倾斜轨道。这个轨道对于空间天文学、空间物理学、空间地球科学的科学目标而言总是单一的和受限的。此外，载人航天平台需要不断地进行轨道维持，以及生命保障系统各种设备的运转，因此对具有高精度指向要求的天文望远镜，以及高微重力水平要求的物理试验来说，载人航天平台也不是一个很好的工作环境。可见，载人航天平台只能为一部分空间科学观测和试验提供支持。当然，如果某项科学试验必须要有人的照料才能完成，那么载人航天平台则一定是首选。但是，由于上述这些限制，在空间站上开展的空间科学试验，较难实现重大的科学突破。回顾国际空间站运行20年后的科学产出，应该是应用成果多于对科学前沿的突破。

然而，空间科学研究确实可以为载人航天的发展提供一个不重复、可持续的工作方向。比如，当一个空间站已经建成，不断的技术突破暂时停滞时，航天员在空间站上开展的各种科学试验，就可以为公众不断地提供关注点，继续维持载人航天的公众性这个特点。

3 深空探测任务的特点

深空探测任务是人类进入太阳系的机器人“侦查兵”。与载人航天任务不同，我们这里所说的深空探测是无人深空探测任务，包括对月球、火星，以及对太阳系其他天体的抵达探测，但不包括对太阳的遥感探测。对太阳的遥感探测，无论是在地球轨道上，还是飞临太阳附近的抵近探测，都属于科学卫星任务。可见，并不是所有深空轨道的任务都是深空探测任务。比如，有些定位于日地系统拉格朗日L1或L2点的空间天文卫星任务，就是空间科学任务。深空探测任务是以行星科学和空间物理学为学科背景、到达太阳系中一个独特的地点、同时具有第一次到达和科学上的发现两个特点[2]。

人类在进入空间时代之后，几乎已经飞临甚至着陆探测了太阳系当中所有八大行星以及部分它们的卫星，包括月球、水星、金星、火星、木星及其系统中的4颗伽利略卫星、土星、天王星和海王星，并在月球、金星、火星，土卫六和几个小行星上成功着陆，还实现了月球样品和小行星样品的采样返回。但是，人类对太阳系及其起源和演化的规律了解仍然太少。即使是同一个天体，在不同的地点着陆都会获得高度

的公众关注和全新的科学认知。例如，尽管人类早在 20 世纪 60 年代就实现了载人登月，但是嫦娥四号无人探测器在月球背面的着陆，仍然是人类的第一次和重大的突破，引起了高度的公众关注度，并获得了新的科学发现。

由此可见，深空探测任务只要选择了新的目的地——无论是飞越、环绕还是着陆，实现了人类的第一次，就可以获得很高的公众关注度。因此，与载人航天任务相似，公众关注度是深空探测任务需要考虑的重要因素和不容忽视的目标。但深空探测任务同时也要关注这个第一次到达的地点所带来的科学发现。如果仅仅是为了达到，而没有新的科学发现，公众就会质疑到那里去的目的是什么？公众对任务的关注度也自然就会降低。因此，科学目标一定是伴随深空任务的重要目标。到太阳系中一个人类还没有去过的地方实现新的科学发现，才是深空探测任务的完整定义和内涵。

因为不断有新的目的地，以及不断产出新的科学发现，深空探测任务的可持续性是比较容易把握的。这主要是得益于太阳系的宏大和其中各种类型天体的众多。至少到现在，我们总是可以找到新的、有重大科学发现意义的目的地。

4 科学卫星任务的特点

科学卫星以突破重大科学前沿为首要目标。与载人航天和深空探测任务不同，科学卫星是以科学目标为最主要目标的航天任务。自人类进入太空开始，科学卫星就是一类非常独特并且始终占有主要航天国家和机构预算一部分的重要任务类型。在美国国家航空航天局（NASA），科学卫星的预算在全部预算中大约占 30%。在欧洲空间局（ESA），科学卫星（不包括空间地球科学、微重力科学和空间生命科学）占全部预算的约 15%。

科学卫星以科学目标的重大性为主要立项标准。虽然并没有把公众的关注度放在首位，但是一旦其实现了重大科学发现，或科学前沿的重大突破，特别是一旦其成果获得了诺贝尔科学奖，将会产生更加突出的公众效应。实际上，自人类进入太空时代以来，已经有大约 10 个科学卫星取得的科学成果获得了诺贝尔奖[3]。因此，科学卫星在立项遴选时，需要特别关注其科学目标的重大性。

科学卫星根据其科学目标的需求，可以选择任意轨道，如大椭圆地球轨道、月球轨道、日地系统拉格朗日点轨道、脱离黄道面的太阳极轨，以及其他行星际轨道。科学卫星上的科学载荷，往往要突破观测和探测精度的极限，从而获得超过前人的数据精度，实现科学发现。因此，每颗科学卫星对空间技术都有其特殊的需求，往往并不重复。这对航天工程设计师特别是科学有效载荷的设计师会提出挑战，并对航天技术发展有很强的带动作用。但是评价一颗科学卫星是否成功的标准，绝不是它实现了哪些技术突破和创新，而是它是否有新的科学发现和对已知理论的修正甚至突破。如果是以技术突破和试验为主，科学研究为辅的卫星任务，则不应被称为是科学卫星，而应称其为技术试验卫星。

5 未来发展和政策建议

我国包含空间科学内容的航天任务由载人航天、深空探测和科学卫星三类任务构成。因此，在规划、部署这三类任务时，为了确保其能够高效的利用国家财政资源，发挥最大的政治作用和科学技术产出，就需要根据它们各自的特点，加以区别并通过不同的政策来给予激励和管理。下面就此提出 4 个方面的建议。

5.1 载人航天任务需要更加关注人与科学应用试验的结合

我国的空间站建设已经接近尾声，即将进入一个以应用为重点的运行阶段。因此，需要重点考虑有人

参与的空间科学试验。并充分发挥空间站平台大、倾斜轨道的特点，大力开展由载荷科学家参与的基础性的、需要反复和长时间探索的流体物理和生命科学试验，并力争获得重大科学突破和可推广的重大应用成果[4]。为了确保试验项目科学目标的重大性，应组织开展公开遴选和征集，同时为每一个试验设立载荷科学家，由其全权负责该项实验的设计、研制和操作运行。

在空间站舱外平台开展对地观测新型遥感器的试验和空间分辨率要求不高的天文巡天观测也是很好的任务方向。由于空间站运行在倾斜轨道上，遥感器可以在大约 90 分钟内就扫过不同的日照角度，并且经过地球的公转也可以实现对全天区的天文观测覆盖，其比较适合开展对地观测和巡天观测的试验项目。其中，遥感器的试验仍属于技术试验类型，而不是科学研究，更像是为对地观测领域的科学或应用卫星做前期技术试验。而天文巡天观测，由于平台稳定性的限制，可以开展对空间分辨率要求不高的科学观测任务。

此外，即使是在空间站的运行阶段，还是不能忘记围绕人做更多的文章。比如，接受国际宇航员入站、建立中国空间站与国际空间站之间的热线电话、开展超过 180 天（甚至打破人类记录）的航天员逗留、接待非航天员游客的短期逗留、地面上疑难病症在太空的治疗等。

在载人航天领域，最为激励中国公众的下一步的发展方向，应该是载人登月。

5.2 深空探测任务要实现首次达到与科学发现并重

我国已经成功掌握了月球探测的相关技术，实现了“绕、落、回”，并发射了数据中继卫星来支持在月球背面开展的探测活动。未来的月球探测任务，应更偏重于对月球资源的原位利用领域的研究和技术开发，为载人登月和未来的月球旅游做好准备。因此，未来的深空探测任务需要不断地向远走，发挥人类第一次到达的公众关注效应。火星的样品返回自然是首选，但是由于火星是很可能存在地外生命的天体，必须高度关注探测器对火星的前向污染和返回样品对地球可能带来的后向污染。前向污染会使返回的样品和科学发现变成“乌龙”事件；后向污染则可能会对地球带来不可估量的生物入侵灾难。

其他能够实现第一次达到的，或具有新的视角的目的地在太阳系内还很多。特别是着陆探测应该作为我国深空探测的一大优势加以发挥。未来，应该继承天问一号“三步并一步”的优势，加快赶超的步伐，对所选天体尽量能实现到达即着陆，并确保实现公众关注度和科学发现的均衡发展。

为了实现重大科学发现，所有深空探测任务在立项初期就要确定整个任务的首席科学家，并在首席科学家的领导下开展目标或着陆点的选择、科学有效载荷的配置、研制中和科学产出相关的各类技术指标的把控、到达后任务运行的规划，直至科学数据的分析和组织。与载人航天任务不同的是，深空探测往往是一个任务一个目标，因此需要任命整个任务的首席科学家。

5.3 科学卫星要以其科学产出为最终评价标准

科学卫星实现可持续发展的要点是要有重大科学产出。因此，为了确保科学产出的最大化，应该对科学卫星的科学产出进行全价值链的管理。包括从战略规划、项目建议、遴选、预研、遴选、背景型号、遴选、立项、设计、试验、生产、发射、在轨测试、运行、任务总结的全过程。在每一个阶段，都应该有确保科学产出最大化的措施[5]。

科学卫星需要设立首席科学家。与载人航天中的单项试验的科学家，以及深空探测任务的首席科学家不同，科学卫星的首席科学家应该具有一票否决权。这是因为科学卫星的目标是以科学产出的重大性为衡量标准的，而首席科学家是对此目标负责的最终责任人。

目前，我国的科学卫星在中国科学院和国家航天

局都有规划，但是要想使其得到可持续的发展，必须确保其科学产出的重大化。因此，需要相关管理部门认真研究在科学卫星项目的各个阶段如何来确保科学产出最大化的措施。

5.4 确保载人航天任务的科学产出是统筹发展的核心

为实现我国空间科学的良性发展，还需要对这三类航天任务中的空间科学统筹考虑。由于载人航天在这三类航天任务中政治性、公众性最高，经费投入最大。为了确保其可持续性，除了不断提升航天员活动的水平以外，空间科学起着很重要的作用。因此，任何空间科学任务目标，如果能够在载人空间站上实现的，都要优先考虑将其放在空间站上来实施；只有不适合在空间站上实施的空间科学任务再考虑放到其他两类任务上来实施。至于深空探测和科学卫星，它们各自有相对独立的定位，相互交叉的科学目标不多。深空探测任务主要瞄准需要实际到达才能实现的科学目标，而科学卫星更关注不需要实际到达（或根本无法达到）就可完成的科学目标，如天文和系外行星探测任务等。

6 结语

在我国三类包括空间科学内容的航天任务中，由于其各自特点的不同，空间科学在其中所占的比重或重要性是不同的。如果用比例数字大致概括投入到空间科学相关活动，包括项目遴选、载荷研制、发射运行和科学研究等的比重：在载人航天任务中，空间科学可以占到大约 30% 的比重；特别是到了空间站阶段，具有科学研究性质的试验所占的比重有可能增加。在深空探测任务中，空间科学相关的活动应该占到 50% 的比重——因为由航天技术来确保实现的第一次到达和由首席科学家及其团队确保的重大科学发现，两者缺一不可。而在科学卫星任务中，对空间科学的重视程度需占到超过 70% 的比重，其他不到 30% 是为了确保科学目标的实现而必须采用的技术创新和对航天技术的带动作用。

我国航天事业正处在一个高速发展的阶段。习近平总书记在 2016 年的“科技三会”上明确指出要“推动空间科学、空间技术、空间应用全面发展”。我们在落实习近平总书记重要指示的时候，应该对不同的航天任务特点进行分析，恰当且实事求是地制定政策和措施，确保我国的空间科学得到全面和可持续的发展。

参考文献

1 吴季. 空间科学概论. 北京: 科学出版社, 2020.
Wu J. Space Science Introduction. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)

2 吴季. 深空探测的现状、展望与建议. 科技导报, 2021, 39(3): 80-87.
Wu J. Deep space exploration: Status, expectation and suggestion. Science & Technology Review, 2021, 39(3): 80-87. (in Chinese)

3 孙丽琳, 吴季. 空间科学对国家科技、经济与社会发展的作用. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 733-739.
Sun L L, Wu J. Generator of wealth, driver of innovation, source of new theory and knowledge—Role of space science in national development. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(6): 733-739. (in Chinese)

4 高铭, 赵光恒, 顾逸东. 我国空间站的空间科学与应用任务. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 721-732.
Gao M, Zhao G H, Gu Y D. Space science and application mission in China’s space station. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(6): 721-732. (in Chinese)

5 吴季. 空间科学任务的全价值链管理和产出评估. 中国科学院院刊, 2019, 34(2): 206-213.
Wu J. Full value chain management and science outputs evaluation of space science missions. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(2): 206-213. (in Chinese)

Space Science in Manned Space Flight, Deep Space Exploration and Scientific Satellite Programs

WU Ji
（1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to implement President Xi's instruction on promoting space science, space technology, and space application all together, national space programs have been developed fast, which are witnessed recently. Space science has become the hot research topic for more and more universities and research institutions. Nevertheless, there are still questions and puzzles about how could space science play its role in manned spaceflight, deep space exploration, and scientific satellites. This paper discusses the role of space science in all three kinds of space programs, starting from the history of space science, and the characteristics of manned space flight, deep space exploration and scientific satellites, and concludes with some policy suggestions.

Keywords manned space flight, deep space exploration, scientific satellite



吴 季 中国科学院国家空间科学中心学术委员会主任、研究员。中国空间科学学会理事长，俄罗斯科学院外籍院士，国际宇航科学院院士，电气和电子工程师协会（IEEE）会士。曾任中国科学院国家空间科学中心主任，中国科学院空间科学战略性先导科技专项I期负责人，嫦娥一号和三号探测器有效载荷总指挥等。获国家科技进步奖一等奖、中国航天基金会特别奖、国际宇航科学院团队成就奖、国际空间研究委员会（COSPAR）国际合作奖等。E-mail: wuji@nssc.ac.cn

WU Ji President of Chinese Society of Space Research, Professor and Chair of the Academic Committee at National Space Science Center (NSSC), Chinese Academy of Sciences (CAS), Foreign Member of Russian Academy of Sciences, Full Member of International Academy of Astronautics (IAA), Fellow of Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). He was the Chief Project Manager of Priority Program for Space Science (I) of CAS, Science Payload Managers of Chang'e 1 and Chang'e 3. He has won several national and international awards, including the first prize of National Science and Technology Progress Award, Special Award of China Space Foundation, the Laurels for Team Achievement Award of IAA, the International Cooperation Medal of Committee on Space Research (COSPAR), etc., and Asteroid 10118 is named after him. E-mail: wuji@nssc.ac.cn

■责任编辑：岳凌生